



HAL
open science

Analyse de sensibilité d'un pont en béton armé pour l'ajustement des coefficients partiels de sécurité.

Midula Alam, F. Lavergne, Silvia Ientile, André Orcesi, Franziska Schmidt

► To cite this version:

Midula Alam, F. Lavergne, Silvia Ientile, André Orcesi, Franziska Schmidt. Analyse de sensibilité d'un pont en béton armé pour l'ajustement des coefficients partiels de sécurité.. 13èmes Journées de Fiabilité des Matériaux et des Structures, Jun 2024, Rouen, France. hal-04901451

HAL Id: hal-04901451

<https://hal.science/hal-04901451v1>

Submitted on 22 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de sensibilité d'un pont en béton armé pour l'ajustement des coefficients partiels de sécurité

Midula Alam¹, Francis Lavergne², Silvia Ientile³, André Orcesi², Franziska Schmidt³

¹ Université Gustave Eiffel, Département MAST, Laboratoire EMGCU, 14-20 Boulevard Newton – Cité Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France, midula.alam@univ-eiffel.fr

² Cerema ITM, 14-20, 8 Boulevard Newton, 77420 Champs-sur-Marne, France

³ Université Gustave Eiffel, Département MAST, Laboratoire EMGCU, 14-20 Boulevard Newton – Cité Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France

ABSTRACT L'évaluation des ouvrages peut être réalisée via des méthodes semi-probabilistes, comme c'est le cas dans les codes de dimensionnement. Cependant, ces codes sont principalement conçus pour le dimensionnement des ouvrages neufs et ne prennent pas en compte les spécificités des ouvrages existants, dont les paramètres peuvent être déterminés de manière plus précise. Pour adapter le formalisme de ces codes, il est possible d'ajuster les coefficients partiels, par exemple en recalibrant les paramètres des lois des variables aléatoires. Les défis des analyses de fiabilité incluent notamment la collecte de données et l'analyse d'ouvrages dans leur intégralité. L'étude se concentre sur une famille d'ouvrages de petite portée en béton armé, les Passages Inférieurs à Portique Ouvert (PIPO), dimensionnés avec le modèle de calcul CHAMOA-P. Cette étude analyse en particulier l'ajustement des coefficients partiels en utilisant les coefficients de sensibilité obtenus dans le calcul de fiabilité et non les valeurs par défauts utilisées dans les Eurocodes. Bien que cette approche soit censée offrir une évaluation plus rigoureuse des ouvrages existants, elle présente des défis liés à l'analyse de ces ouvrages. L'efficacité des ajustements est évaluée en comparant les résultats avec des cas d'étude et les codes existants.

Keywords : fiabilité, coefficient de sensibilité, pont routier, béton armé, ouvrage existant

I. INTRODUCTION

L'ajustement des coefficients partiels (CP) est une option intéressante lorsqu'il s'agit d'évaluer la fiabilité des structures existantes. En effet, si l'aspect sécuritaire de certains règlements ne pose de pas de problème particulier à la conception, il est en est autrement lors de l'expertise d'un ouvrage existant. En effet, un excès de 5 à 10% de la quantité de matériaux à la conception par rapport à une quantité strictement nécessaire n'aura pas un impact significatif. A l'inverse, ne pas respecter un critère particulier pour un ouvrage existant et devoir projeter une réhabilitation, voire une démolition peut avoir un impact économique et environnemental important, si ce critère est trop sécuritaire. Il est donc important de pouvoir affiner les modèles si nécessaire et de pouvoir prendre en compte toute la connaissance que l'on a lors de l'expertise d'un ouvrage existant (via des mesures ou des auscultations par exemple). Cela exige néanmoins la collecte de données

empiriques (Crémona et al., 2013) et l'emploi de méthodes avancées pour une évaluation précise de ces facteurs (Diamantidis et al. 2024).

Ce travail propose un cadre aligné sur les normes de l'Eurocode et sur le TS 17440, utilisant des logiciels d'ingénierie pour la modélisation complète des structures. Cette approche vise à optimiser les CP en ajustant le niveau d'incertitudes de certaines variables et également un niveau de fiabilité cible ("NF EN 1991-2", 2004 ; "NF EN 1992-1-1", 2005 ; "FprCEN/TS 17440", 2020 ; "TS 17440", 2020).

L'étude examine comment adapter les CP en respectant les principes de fiabilité et les normes en vigueur, pour une application concrète sur des ponts routiers français. Elle porte sur les passages inférieurs en portique ouvert (PIPO), constitués de dalle en béton armé, qui sont des ouvrages très communément rencontrés en France. Ils présentent une robustesse importante, évitant dans un premier temps les problématiques liées aux ouvrages pathologiques, ce qui permet l'application de formules existantes pour l'ajustement des CP (Caspeele et Van Den Hende, 2023). Plus précisément, l'objectif est d'observer l'impact du choix des coefficients de sensibilité pour les variables aléatoires considérées : soit avec les valeurs utilisées dans les Eurocodes, soit avec des valeurs obtenues par une analyse de fiabilité pour la famille d'ouvrages considérée. Elle propose ainsi une méthode d'évaluation permettant une application des avancées théoriques en fiabilité structurelle à des applications pratiques, tout en améliorant l'exactitude des évaluations structurelles pour une gestion durable des infrastructures.

II. METHODE D'AJUSTEMENT DES COEFFICIENTS PARTIELS DE SECURITE

L'ajustement des coefficients partiels de sécurité peut être effectué à partir des concepts de fiabilité décrits par la méthode FORM (First Order Reliability Method) (Caspeele et al., 2013 ; *fib* Bulletin 80, 2016). De plus, le Model Code 2020 (Caspeele et Van Den Hende, 2023 ; Hajek, 2023) reprend ces éléments et décline les lois de probabilités et les coefficients partiels conformément aux hypothèses de l'Eurocode afin de proposer des CP actualisés (Association française de normalisation, 2007 ; CEN, 2005). Les coefficients partiels sont calculés comme le rapport entre un fractile (par exemple à 5%) et le point de fonctionnement déterminé par la méthode FORM (cf. exemple pour les matériaux dans l'équation II-1).

$$\gamma_X = \frac{X_k}{X_d} \text{ (pour les variables de résistance)} \quad (\text{II-1})$$

avec :

- γ_X le coefficient partiel pour la variable aléatoire X ,
- X_k un fractile (par exemple à 5%) de la variable aléatoire X ,
- X_d le point de fonctionnement de la variable aléatoire X .

Selon les pratiques actuelles, les CP peuvent être ajustés selon deux approches distinctes. Une première considère de manière séparée les variables d'incertitudes, avec la détermination des CP pour chacune des sources d'incertitudes (*fib* bulletin 80, 2016). Une deuxième approche, quant à elle, consiste à utiliser une seule variable englobant plusieurs sources d'incertitudes, via un coefficient global sur l'incertitude (Annex A du prEN 1992-1-1:2021, *fib* MC 2020). On distingue alors les incertitudes sur la résistance et celles sur les sollicitations. Ces deux approches se basent

sur des méthodes différentes pour ajuster les CP en tenant compte des incertitudes dans les calculs de sécurité des structures (Orcesi et al., 2023). Dans le cas des variables sur les matériaux, on peut exprimer les CP selon l'équation (II-2). L'approche des CP séparés sera utilisée pour illustration dans la suite de l'étude.

$$\gamma_M = \gamma_{Rd} \times \gamma_m = \gamma_{Rd1} \times \gamma_{Rd2} \times \gamma_m \quad (\text{II-2})$$

avec :

- γ_m le coefficient partiel sur les caractéristiques physiques d'un matériau,
- γ_{Rd} le coefficient partiel global sur les incertitudes,
- γ_{Rd1} le coefficient partiel permettant de prendre en compte les incertitudes de modèle,
- γ_{Rd2} le coefficient partiel permettant de prendre en compte les incertitudes de géométrie.

La Table 1 fournit le calcul de CP pour différents types de variables aléatoires.

TABLE 1. Détail des équations du calcul des coefficients partiels de sécurité par FORM

Coefficient partiel	Formule	Loi	Remarques
γ_m	$\frac{\exp(-1,645V_X)}{\exp(-\alpha_R\beta V_X)}$	Lognormale	(fib Bulletin 80, 2016)
γ_g	$\frac{(1 - \alpha_S\beta V_G)}{(1 + k V_G)}$	Normale	$k = 0$ pour les charges courantes (fib Bulletin 80, 2016)
γ_q	$\frac{1 - \frac{0,5772}{1,282} V_{Q,50} - \frac{V_{Q,50}}{1,282} \ln\{-\ln[\Phi(-\alpha_S \times \beta)]\}}{1 - \frac{\ln(2) - \ln[-\ln 0,90] - 0,5772}{1,282} \times V_{q50}}$	Gumbel	Période de référence de 50 ans et période de retour de 1000 ans (Orcesi et al., 2023)
γ_{Rd}	$\frac{1}{1 - \alpha_{ND}\alpha_R\beta V_{\theta_R}}$	Normale	König et Hosser (1982) (fib Bulletin 80, 2016)
γ_{Rd}	$\frac{1}{\exp(-\alpha_{ND}\alpha_R\beta V_{\theta_R})}$	Lognormale	Taerwe (1993) (fib Bulletin 80, 2016)
γ_{Rd}	$\frac{\exp(-1,645 V_{\theta_R})}{\exp(-\alpha_{ND}\alpha_R\beta V_{\theta_R})}$	Lognormale	Taerwe (1993) (fib Bulletin 80, 2016)
γ_{sd}	$1 - \alpha_{ND}\alpha_S\beta V_{\theta_S}$	Normale	König et Hosser 1982 (fib Bulletin 80, 2016)

L'ajustement d'un CP peut se faire en ajustant différents paramètres tels que : (i) le coefficient de variation lorsque des données plus précises existent permettant ainsi de diminuer les incertitudes (mesures, géométrie et méthode), (ii) l'indice de fiabilité cible qui rend compte du niveau de sécurité attendu de l'ouvrage (Holický et al., 2008) et (iii) les coefficients de sensibilité qui rendent compte du poids des variables aléatoires dans le modèle de calcul. En effet, les CP étant définis par rapport à l'expression simplifiée de X_k et X_d , ils dépendent de coefficients de sensibilité. Ces coefficients de sensibilité permettent d'indiquer la contribution de la variable aléatoire X pour le calcul de l'indice

de fiabilité. Ils sont dérivés à partir de la linéarisation de l'équation d'état limite non linéaire au point de conception u^* et représentent les cosinus directeurs des variables aléatoires dans l'espace normalisé (Figure 1) (Youn, 2005).

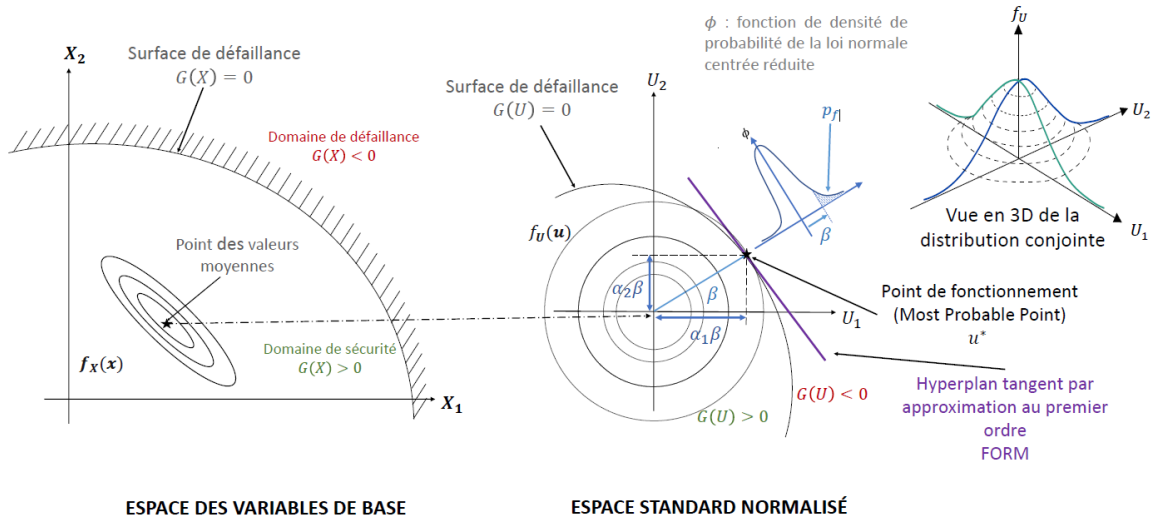


FIGURE 1. Principe de First-order reliability method

Pour les CP tels que définis dans les Eurocodes, les coefficients de sensibilité ont initialement été déterminés par approche FORM en fonction de valeur de coefficients de variation pour les variables de résistances et de sollicitations pour des valeurs de période de référence fixé. Pour une période de référence de 50 ans, König and Hosser, (1981) ont proposé les valeurs fixes $\alpha_S = -0,7$ et $\alpha_R = 0,8$ et un coefficient multiplicateur $\alpha_{ND} = 0,4$ de α_S et α_R utilisé pour décrire le coefficient de sensibilité d'une variable secondaire (par exemple pour les incertitudes). L'objectif dans la suite de l'étude est de regarder l'impact du choix des coefficients de sensibilité.

III. MÉTHODOLOGIE

A. Mise en place du modèle

L'actualisation des coefficients partiels, notamment en ajustant les coefficients de sensibilité, implique la création d'un modèle spécifique pour les ouvrages étudiés, à savoir les Passages Inférieurs à Portique Ouvert (PIPO) (PIPO.EL, 2002).

Les calculs de dimensionnement et recalcul d'ouvrage passent par l'utilisation de logiciel de calcul. Parmi ces logiciels on retrouve la chaîne de calculs Chamoia-P du Cerema (CHAMOA – PIPO, 2023). Dans Chamoia-P, le portique est décrit par un modèle plan dans lequel la traverse, les piédroits et les semelles sont des barres. L'effet de la répartition transversale est pris en compte par la méthode de Guyon Massonnet. Les sollicitations dans les sections sont évaluées comme des superpositions de solutions d'élasticité linéaires pondérées pour obtenir les combinaisons décrites par les Eurocodes et leurs annexes françaises ("NF EN 1991-2", 2004). A partir de ces sollicitations, Chamoia-P procède à des calculs de section pour évaluer la quantité d'acier nécessaire à ce que la structure respecte les critères définis par les Eurocodes aux ELU et ELS. Chamoia-P s'appuyant sur

le logiciel de calcul à barre ST1v2.23 (CEREMA, 2020), ce dernier est ici employé pour évaluer les efforts sollicitants (cf. Figure 2). Une quantité d'acier étant fixée, l'application numérique de calcul de section CDS 6.35 (CEREMA, 2022) est utilisée pour construire le diagramme d'interaction de la section à chaque état limite, décrivant ainsi le domaine des efforts auxquels la section peut résister.

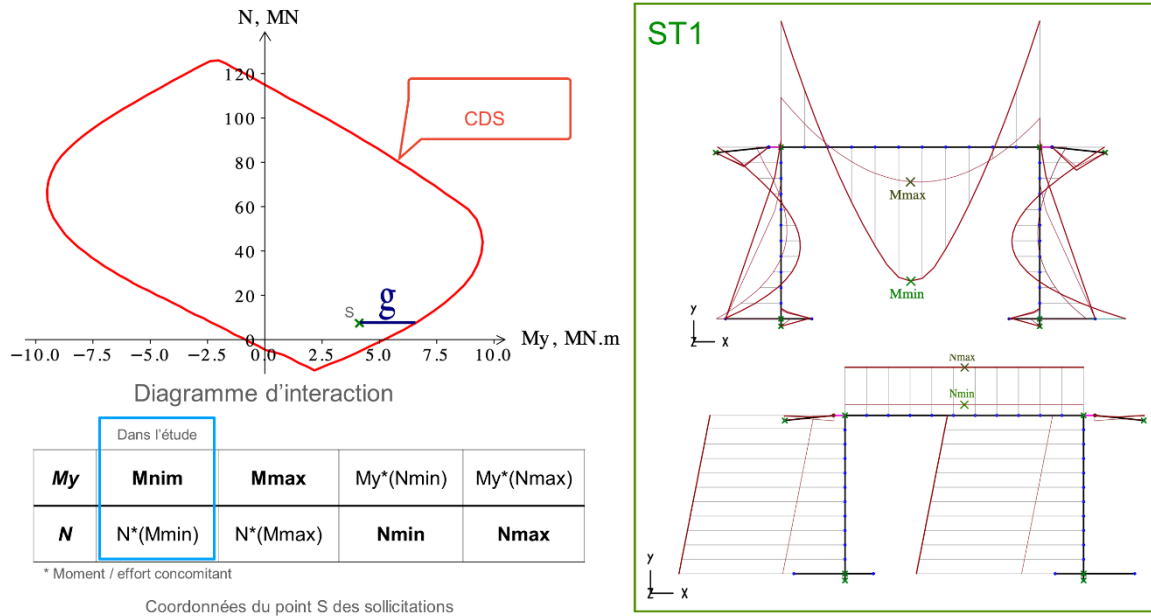


FIGURE 2. Schéma de principe de la fonction d'état limite G

La fonction d'état limite pour l'étude se base sur les diagrammes d'interaction N-M de la section d'intérêt située à mi travée. On a ainsi pour chaque état limite une connaissance précise des combinaisons d'efforts normaux N et de moments M pour lesquels la section peut satisfaire les critères de résistance. Si l'effort normal sollicitant est supportable, l'effort résistant est ainsi défini comme le point du diagramme d'interaction qui présente le même effort normal, et un moment du même signe que le moment sollicitant (Figure 2)(Pugliese et. al. 2022). Pour un tirage donné des variables aléatoires considérées (résistance de l'acier, épaisseur d'enrobage, densité des matériaux, intensité du trafic, ...), la comparaison de l'effort sollicitant et de l'effort résistant (notée *g*) permet de définir la fonction d'état limite (notée *G*), qui est positive si la structure tient et négative si elle est insuffisante. Ainsi, la fonction d'état limite *G* est définie par l'équation (III-1).

$$G(X) = M_R(X_R, N_S) - M_S(X_S, N_S) \tag{III-1}$$

$G > 0$: dans le domaine de sécurité

$G < 0$: dans le domaine de défaillance

avec :

- *G* la fonction d'état limite,
- *g* la valeur de *G* pour un tirage donné,
- *X* le vecteur des variables aléatoires,
- *M_R* le moment résistant du diagramme d'interaction déterminé à partir de CDS 6.35 (CEREMA, 2022),
- *X_R* le vecteur des variables aléatoires liées à la résistance,

- M_S le moment sollicitant associé au point S de coordonnées (M_{y_S}, N_S) de la section subissant les sollicitations les plus critiques, déterminé par ST1v2.23 (CEREMA, 2020),
- X_R le vecteur des variables aléatoires liées aux sollicitations.

On peut donc estimer la probabilité de défaillance liée à l'état limite G . On en retire également le point de fonctionnement ainsi que les coefficients de sensibilité α_S, α_R .

L'étude est réalisée à l'état limite ultime (ELU) fondamental. On définit quatre modes de défaillance pour chacun des états limites ; rupture en moment fléchissant sous moment maximal avec traction des fibres inférieures de la travée (noté M_{min}), rupture en moment fléchissant sous moment avec les fibres inférieures de la travée en compression (noté M_{max}), rupture en moment fléchissant associé au moment concomitant à l'effort axial maximal ou minimal (noté respectivement N_{max} et N_{min}). Le mode de défaillance principal se fait par rupture en moment fléchissant sous moment maximal avec mise en traction des fibres inférieures de la travée (cas en bleu sur la Figure 2) qui est le cas discuté dans la suite. Cette étude préliminaire a été effectuée sur un petit nombre d'ouvrages. On procède donc à la génération d'une banque d'ouvrage PIPO.

B. Présentation des ouvrages étudiés

Des caractéristiques communes sont observées pour les quatre ouvrages étudiés. Il s'agit de deux profils urbains (U10 et U15 pour une ouverture de 10m et 15m, respectivement) composés de 7,50 m de chaussée (comprenant une couche d'étanchéité de 2 cm et un enrobé de 10 cm), ainsi que de deux trottoirs de 1,25 m. Ces routes accueillent des trafics de type LM1, LM2 en classe de trafic 2, LM4, sans convoi exceptionnel ou militaire. En outre, deux profils autoroutiers (A10 et A15, pour une ouverture de 10m et 15m, respectivement) sont considérés, comprenant une glissière de 0,5 m, une chaussée de 11 m, et un BN4 de 0,8 m avec présence de dalle de transition. Ces autoroutes sont parcourues par des trafics de type LM1, LM2 en classe de trafic 1, ainsi que des convois MC120.

Pour chacun de ces ouvrages la hauteur libre est de 5,5 m, la fiche dans le sol est de 1,5 m avec une hauteur de piédroit de 6,4 m et des semelles d'épaisseur de 60 cm. Le détail du ferrailage est donné dans la Table 2. Ces quantités d'acier à mi travée ont été calculées en utilisant les coefficients des Eurocodes, et l'état limite dimensionnant est bien le trafic LM1 principal à l'ELU.

TABLE 2. Détail du ferrailage des ouvrages

Ouvrage	PIPO_TTT_U10	PIPO_TTT_U15	PIPO_TTT_A10	PIPO_TTT_A15
Ouverture (m)	10	15	10	15
Acier inférieur à mi-travée	67 HA25	100 HA25	113 HA25	88 HA32
Epaisseur de dalle (m)	0,45	0,6	0,5	0,65
Acier supérieur à mi-travée	67 HA8	100 HA8	113 HA8	88 HA8
Espacement (cm)	15	10	10	14,3

Les ouvrages sont modélisés sur un sol meuble, normalement consolidé dont les propriétés sont : $E_{Ménard} = 100$ MPa, pression limite de 1 MPa et le paramètre rhéologique rendant compte de la déformabilité du sol est fixé à 0,5. On suppose une classe d'exposition XC2.

On considère également un effet thermique représentatif de la Seine et Marne, selon EN1991-1-5/NA, avec un revêtement sombre. La température uniforme maximum est de 30°C, la température uniforme minimum de -27°C avec un gradient positif de 18°C et un gradient négatif de -6°C. La température n'est pas considérée comme une variable aléatoire dans cette étude.

C. Variables aléatoires

Des variables aléatoires dominantes, présentant des coefficients de sensibilité importants, ont été identifiées dans les calculs de fiabilité à partir d'analyses d'études de cas et de la bibliographie (Diamantidis et al., 2024 ; Joint Committee on Structural Safety, 2021 ; Orcesi et al., 2023 ; fib Bulletin 80, 2016). Il est important de limiter le nombre de variables aléatoires aux variables prépondérantes, c'est-à-dire celles qui ont le plus d'impact sur la variabilité du résultat d'évaluation. La méthode de calcul utilisée dans l'étude est celle présentée dans les Eurocodes ("NF EN 1991-2", 2004 ; "NF EN 1992-1-1", 2005), on peut donc reprendre les incertitudes telles que définies dans les Eurocodes.

Les variables aléatoires considérées pour l'étude sont décrites dans la Table 3, avec f_c la résistance à la compression du béton à 28 jours, f_y la résistance à la traction de l'acier, Δc l'excès ou défaut d'enrobage, ρ_{RC} la masse volumique du béton, q_{LM1} le chargement réparti lié au LM1 pour une classe de trafic CC2 sur la voie 1, $\theta_{Rd,c}$ l'incertitude de modèle sur la résistance du béton en compression à 28 jours, $\theta_{Rd,s}$ l'incertitude du modèle sur la résistance à traction de l'acier, $\theta_{Sd,g}$ l'incertitude de modèle sur le poids propre et $\theta_{Sd,q}$ l'incertitude de modèle sur les charges de trafic au LM1. Le but de la démarche étant de s'intéresser à des ouvrages ayant été dimensionnés avec d'autres règlements moins exigeants, ou présentant des pathologies telles que la corrosion, la résistance des aciers a été délibérément réduite. Ces ouvrages ont été dimensionnés pour tenir à l'aide d'armature de classe B500B, de limite élastique caractéristique $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ et nous considérerons ici que la limite élastique de l'acier, dégradée, a une valeur moyenne de 375 MPa . Dans le modèle, q_{LM1} est utilisé pour introduire un coefficient pondérateur afin de mettre à l'échelle les autres composantes du LM1. Pour un ouvrage de classe de trafic CC2, le coefficient de pondération de la charge répartie sur la voie 1 est $a_{q_{1,EN}} = 0,7$ et la charge répartie sur la voie 1 est $q_{1,EN} = 9 \text{ kN/m}^2$ ("NF EN 1991-2", 2004). Le coefficient pondérateur est alors obtenu par $a_{LM1} = \frac{q_{LM1}}{0,7 \times 9}$.

TABLE 3. Détail des variables aléatoires considérées

Variable	Unité	Loi	Moyenne	Ecart-type	COV	Source
f_c	MPa	Lognormale	36	5,4	15%	(Joint Committee on Structural Safety, 2021)
f_y	MPa	Lognormale	375	11,7	4,5%	(Orcesi et al., 2023) (Caspeele et Van Den Hende, 2023)
ρ_{RC}	kN/m	Normale	25	2	8%	(Orcesi et al., 2023)
q_{LM1}	kN/m ²	Gumbel	7,9	0,61	7,8%	(Markova, et al., 2013)
Δc	m	Normale	0	0,005		(fib Bulletin 80, 2016)
$\theta_{Rd,c}$		Lognormale	1,2	0,18	15%	

$\theta_{Rd,s}$		Lognormale	1	0,05	5%	(Joint Committee on Structural Safety, 2021)
$\theta_{Sd,g}$		Normale	1	0,06	6%	
$\theta_{Sd,q}$		Normale	1	0,08	8%	

D. Définition de nouveaux coefficients de sensibilité liés aux ouvrages de type PIPO

Une analyse probabiliste des ouvrages est réalisée via la méthode de surface de réponse (MSR) (Mohammadkhani-Shali, 2007). La MSR permet d'élaborer des modèles substituts qui approchent les comportements complexes des systèmes, facilitant ainsi les prédictions itératives de fiabilité (Mohammadkhani-Shali, 2007 ; Moustapha et al., 2022). Avec une surface de réponse linéaire, l'objectif est d'explorer les relations linéaires entre les variables indépendantes et la ou les variable(s) dépendante(s), sans considérer les effets d'interaction complexe ou les non-linéarités (comme les termes quadratiques). L'algorithme de surface de réponse approxime un plan orthogonal au point de calcul le plus proche du point de fonctionnement réel du système. Le choix d'une surface de réponse linéaire permet de s'approcher du modèle FORM qui modélise un plan orthogonal passant par le point de fonctionnement, ce qui permet de rester conforme aux hypothèses considérées pour les formules présentées dans la Table 1.

Afin de parcourir efficacement l'espace des variables, des schémas de conception sont utilisés pour décrire les points d'échantillonnage. Ils permettent de déterminer les ensembles de valeurs de variables les plus pertinents afin d'optimiser l'information obtenue tout en minimisant les ressources utilisées (Roussouly et al., 2013). Parmi les schémas proposés dans la boîte à outils ReliabTbx (Crémona, 2010), on retrouve le plan en étoile, le plan en étoile modifié et le schéma composite central. Un schéma en étoile consiste en $2n + 1$ expériences réalisées autour d'un point de calcul, ce qui permet une estimation centrée de la différentielle de la fonction d'état limite G au point d'étude. L'algorithme de MSR fait appel à un processus itératif visant à déterminer un nouveau point plus proche de l'état limite. Le choix du plan en étoile suffit à fournir une bonne approximation de l'indice de fiabilité cible dans le cas d'une surface de réponse linéaire. La précision pour la convergence est fixée avec un critère tel que $\Delta\beta = 0,01$.

IV. RÉSULTATS ET ANALYSE

À partir des variables considérées, il est possible de réaliser des analyses fiabilistes pour chacun des ouvrages. Les indices de fiabilité dans la Table 4 et les points de fonctionnement obtenus pour les quatre ouvrages sont indiqués dans la Table 5.

TABLE 4. Résultat des indices de fiabilité

	A10	A15	U10	U15
β	3,7	3,7	2,8	3,8
p_f	0,0094%	0,010%	0,28%	0,0070%

Les résultats des indices de fiabilité pour les ouvrages A10, A15 et U15 sont tous proches de l'indice de fiabilité 3,8. Les coefficients de sensibilité étant dépendant de l'indice de fiabilité, la suite de l'étude ne porte que sur ces trois ouvrages, par soucis d'homogénéité.

TABLE 5. Valeurs des variables aléatoires aux points de fonctionnement

Variable	Unité	A10	A15	U10	U15
f_c	MPa	34,05	34,48	34,26	33,41
f_y	MPa	353,49	355,03	358,53	351,72
ρ_{RC}	kN/m	25,59	25,75	25,80	26,54
q_{LM1}	kN/m ²	10,73	10,53	9,34	10,45
Δc	m	0,0019	0,0013	0,0015	0,0006
$\theta_{Rd,c}$		1,14	1,15	1,15	1,15
$\theta_{Rd,s}$		0,94	0,93	0,95	0,93
$\theta_{Sd,g}$		1,01	1,02	1,01	1,04
$\theta_{Sd,q}$		1,09	1,11	1,10	1,09

Les points de fonctionnement sont assez proches pour les quatre ouvrages étudiés. Cette stabilité, malgré des variations dans les indices de fiabilité (Table 4), indique une robustesse du modèle de calcul. Cela suggère que les ouvrages PIPO partagent des caractéristiques prévisibles en termes de réponse aux charges.

En analysant les valeurs des coefficients de sensibilité obtenus, on détermine une valeur moyenne de coefficient de sensibilité pour chacune des variables considérées (Figure 3).

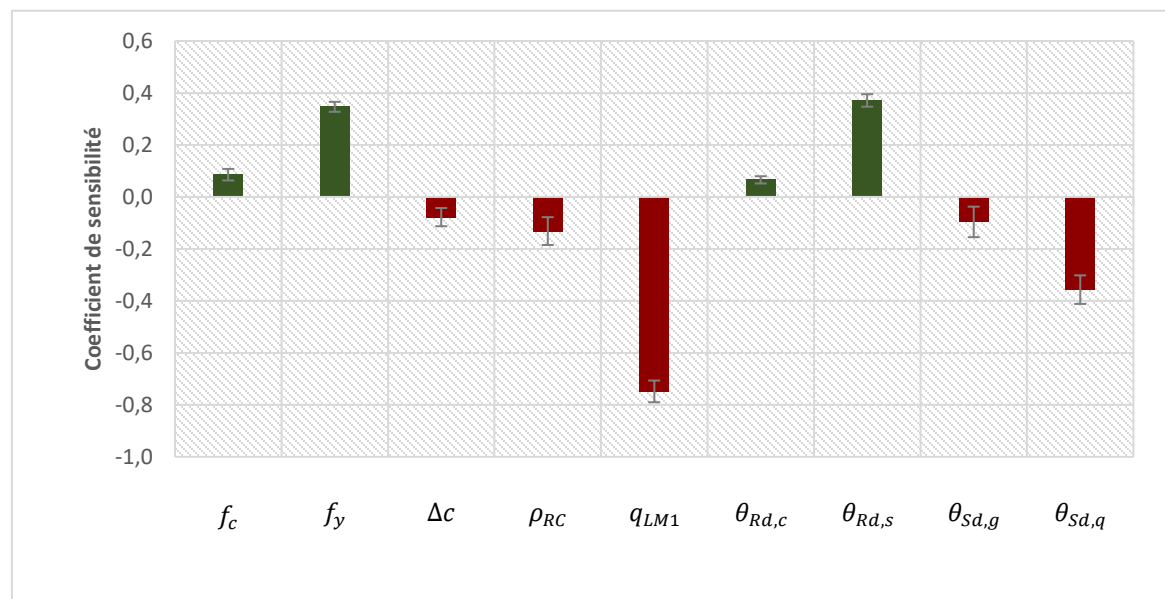


FIGURE 3. Valeurs moyennes des coefficients de sensibilité à l'ELU fondamentale M_{max} à mi-travée (en vert les variables de résistance et en rouge les variables de sollicitation)

Les analyses des coefficients de sensibilité réalisées sur les configurations de ponts A10, A15, U10, et U15 permettent d'identifier les variables significatives affectant la réponse structurale sous charges. Les variables augmentant la fiabilité présentent des coefficients positifs (f_c , f_y , $\theta_{Rd,c}$ et $\theta_{Rd,s}$), tandis que celles réduisant la fiabilité affichent des coefficients négatifs (Δc , ρ_{RC} , q_{LM1} , $\theta_{Sd,g}$ et $\theta_{Sd,q}$). Le coefficient de sensibilité pour la variable Δc (variable de géométrie sur la section) présente

une valeur négative car lorsque l'enrobage augmente l'indice de fiabilité diminue s'explique car lorsque l'enrobage augmente, on diminue la section qui résiste aux efforts et on augmente par ailleurs le poids propre.

Deux types d'approches sont proposées ci-après. Dans un premier temps (approche 1), les coefficients de sensibilité des neuf variables aléatoires sont regroupés par groupes de résistance et de sollicitation, respectivement, pour déterminer α_R et α_S comme suit :

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j} \alpha_{R,ij}^2} ; \\ \alpha_S &= -\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j} \alpha_{S,ij}^2}\end{aligned}\tag{IV-1}$$

avec $\alpha_{R,ij}$ est l'indice de sensibilité obtenu pour l'ouvrage i , pour la variable associée à la résistance j , $\alpha_{S,ij}$ est l'indice de sensibilité obtenu pour l'ouvrage i , pour la variable associée à la sollicitation j et n le nombre d'ouvrages traités.

Cette approche permet de se ramener à un problème de base $R - S$. Les coefficients de sensibilité déterminés (sur les ouvrages A10, A15 et U15) à partir de l'équation (IV-1) sont $\alpha_S = -0,85$ et $\alpha_R = 0,52$. Ces valeurs divergent légèrement des hypothèses de l'Eurocode ($\alpha_S = -0,7$, $\alpha_R = 0,8$). Les coefficients partiels pour les deux premières variables dominantes ($q_1, \theta_{sd,q}$, f_y et $\theta_{Rd,s}$) sont calculés avec ces nouvelles valeurs ($\alpha_S = -0,85$, $\alpha_R = 0,52$) en appliquant le coefficient multiplicateur $\alpha_{ND} = 0,4$ pour les variables secondaires (en considérant $\beta_c = 3,8$) : $\gamma_Q = 1,23$ et $\gamma_S = 1,06$.

Une seconde approche (approche 2) considère que le résultat du calcul de fiabilité (Figure 3) permet d'identifier directement une variable dominante, q_{LM1} , avec un coefficient de $-0,75$, et trois variables secondaires, f_y , $\theta_{Rd,s}$, et $\theta_{sd,q}$, avec des coefficients de $0,35$, $0,37$ et $-0,33$ respectivement. Ces valeurs sont alors utilisées pour calculer un CP pour les trois ouvrages étudiés (en considérant $\beta_c = 3,8$) : $\gamma_Q = 1,23$ et $\gamma_S = 1,06$. Les autres variables γ_C et γ_G , ayant une influence moins significative, ne requièrent pas d'ajustement, permettant de focaliser la calibration sur les éléments les plus influents vis-à-vis de la fiabilité structurelle pour le cas d'un mode de défaillance par traction des aciers dans la fibre inférieure.

Dans cette étude, les valeurs de γ_Q et γ_S ajustés selon les deux approches donnent les mêmes résultats. Les valeurs trouvées sont également proches des valeurs ajustées dans le *fib* MC2020 qui propose $\gamma_Q = 1,25$ et $\gamma_S = 1,10$ (Caspele et Van Den Hende, 2023).

V. CONCLUSION

Cette étude analyse l'ajustement des coefficients partiels (CP) en prenant en compte les coefficients de sensibilité spécifiques aux ouvrages de type Passage Inférieur à Portique Ouvert, modélisés via la chaîne de calcul Chamois-P. L'approche adoptée permet d'identifier des coefficients partiels distincts pour chaque variable, révélant que les incertitudes sur certaines d'entre elles prédominent sur les autres. Notamment, la variable liée au trafic émerge comme une variable dominante dans le calcul de fiabilité.

Les coefficients de sensibilité ont été calculés à partir de paramètres suivant des lois de probabilité tirées de la littérature. L'analyse de la fiabilité structurelle gagnerait en précision avec la

prise en compte de plusieurs modes de défaillance pour une évaluation exhaustive des ouvrages. Se concentrer uniquement sur un mode de défaillance peut omettre des vulnérabilités associées à d'autres scénarios de défaillance. En élargissant l'analyse à divers modes de défaillance, l'estimation de la fiabilité pourra être améliorée, offrant ainsi une perspective plus complète de la performance structurelle. De plus, il sera nécessaire de vérifier les écarts de fiabilité obtenus à partir de valeurs fixes pour les coefficients de sensibilité pour s'assurer que les coefficients partiels sont adéquats et représentent fidèlement les risques.

Une analyse plus approfondie, examinant la variabilité des coefficients de sensibilité en fonction des paramètres des lois statistiques (moyenne et écart-type), permettra de déterminer des coefficients de sensibilité adaptés à une large gamme de distributions. On observe également que le poids des variables d'incertitude peut être significatif sur certains paramètres, soulignant l'importance de prendre en compte les principales sources d'incertitude du modèle. Il est donc crucial de baser cette analyse sur des données réelles et de vérifier la cohérence des moyennes et des écarts-types avec des données expérimentales.

Enfin, les travaux du *fib* Model Code 2020 recommandent d'adopter des valeurs des coefficients de sensibilité différentes pour les ouvrages existants, en considérant une période de référence de 1 an au lieu de 50 ans, puisque la durée de vie attendue d'un ouvrage existant diffère de celle d'un ouvrage neuf. Cette modification influence la valeur de l'indice de fiabilité cible. Ainsi, les valeurs de coefficient de sensibilité proposées sont $\alpha_S = -0,8$ et $\alpha_R = 0,7$ (Caspéele et Van Den Hende, 2023).

VI. REFERENCES

- Association française de normalisation (2007). Eurocode - Bases de calcul des structures - Annexe nationale - NF EN 1990/A1:2006.
- Caspéele, R., Sýkora, M., Allaix, D.L., Steenbergen, R.D.J.M. (2013). The Design Value Method and Adjusted Partial Factor Approach for Existing Structures. *Structural Engineering International*, 23, 386–393. <https://doi.org/10.2749/101686613X13627347100194>
- Caspéele, R., Van Den Hende, K. (2023). Validation of the harmonized partial factor method for design and assessment of concrete structures as proposed for *fib* model code 2020. *Structural Concrete*, 24, 4368–4376. <https://doi.org/10.1002/suco.202201109>
- CEN (2004). Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels: European Committee for Standardization. EN 1991-2:2004.
- CEN (2005). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization. EN 1992-1-1:2005.
- CEN (2005). EN1990: Basis of structural design. Brussels. URL <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf> (accessed 12.4.21).
- CEN (2020). Evaluation and Renovation of Existing Structures - FprCEN/TS 17440:2020 (F). Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2021). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization. Annex A. prEN 1992-1-1:2021.

- CEREMA (2020). ST1v2.23 [Logiciel]. Disponible sur: [https://logiciels-
oa.cerema.fr/LogicielsOA/ST1/st1.html](https://logiciels-
oa.cerema.fr/LogicielsOA/ST1/st1.html). Paris: Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.
- CEREMA (2022). CDS, Version 6.35 [Logiciel]. Disponible sur: [https://logiciels-
oa.cerema.fr/LogicielsOA/CDS/cds.html](https://logiciels-
oa.cerema.fr/LogicielsOA/CDS/cds.html). Paris: Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.
- CHaîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art Programme de calcul des ouvrages de type PIPO (2023). *Les outils*. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.
- Crémona, C. (2010). ReliabTbx Release 1.5 - Structural Reliability Toolbox.
- Crémona, C., Poulin, B., Colas, A.-S., Michel, J., Marcotte, C., Vion, B., Orcesi, A., Sadone, R. (2013). Calibration of partial safety factors for the assessment of existing bridges. *Presented at the IABSE Conference, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures, Rotterdam, The Netherlands*, pp. 290–291. <https://doi.org/10.2749/222137813806479133>
- Diamantidis, D., Tanner, P., Holicky, M., Madsen, H.O., Sykora, M. (2024). On reliability assessment of existing structures. *Structural Safety*, 102452. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102452>
- Hajek, P. (2023). Sustainability perspective in *fib* MC2020: Contribution of concrete structures to sustainability. *Structural Concrete*, 24, 4352–4361. <https://doi.org/10.1002/suco.202300022>
- Holický, M., Markova, J., Sýkora, M. (2008). Partial factors for assessment of existing reinforced concrete bridges. *6th International Probabilistic Workshop*.
- Joint Committee on Structural Safety (2021). *JCSS Probabilistic Model Code*. [https://www.jcss-
lc.org/jcss-probabilistic-model-code/](https://www.jcss-
lc.org/jcss-probabilistic-model-code/)
- König, G., Hosser, D. (1981). The simplified level II method and its application on the derivation of safety elements for level I, In: *Conceptual Preparation of Future Codes - Progress Report*, CEB Bulletin. fédération internationale du béton, Technische Hochschule Darmstadt, p. 65.
- Markova, J., Holicky, M., Sykora, M., Kral, J. (2013). Probabilistic assessment of traffic loads on bridges, In: *Safety, Reliability and Risk Analysis*. CRC Press, pp. 2613–2618. [https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b15938-393/probabilistic-
assessment-traffic-loads-bridges-markova-holicky-sykora-kral](https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b15938-393/probabilistic-
assessment-traffic-loads-bridges-markova-holicky-sykora-kral)
- Mohammadkhani-Shali, S. (2007). Study of system redundancy in bridges: failure mechanism analysis using response surface methods. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Moustapha, M., Marelli, S., Sudret, B. (2022). Active learning for structural reliability: Survey, general framework and benchmark. *Structural Safety*, 96, 102174. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102174>
- Orcesi, A., Dr., Diamantidis, D., Prof., O'Connor, A., Prof., Palmisano, F., Dr., Sykora, M., Dr., Boros, V., Dr., Caspeele, R., Prof., Chateaneuf, A., Prof., Mandić Ivanković, A., Prof., Lenner, R., Dr., Kušter Marić, M., Prof., Nadolski, V., Dr., Schmidt, F., Dr., Skokandić, D., Dr., Van der Spuy, P., Dr. (2023). Investigating Partial Factors for the Assessment of Existing Reinforced Concrete Bridges. *Structural Engineering International*. <https://doi.org/10.1080/10168664.2023.2204115>
- Partial factor methods for existing concrete structures (2016). *fib* Bulletin 80. fib. The International Federation for Structural Concrete, Lausanne. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0080>
- Programme PIPO 74 - Notice d'emploi (2002). Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. <https://dtrf.cerema.fr/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000504/DT504.pdf>
- Pugliese, F., De Risi, R. Di Sarno (2022) L., Reliability assessment of existing RC bridges with spatially-variable pitting corrosion subjected to increasing traffic demand. *Reliability*

- Engineering and System Safety*, 218(A), article 108137.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108137>
- Roussouly, N. Petitjean, F., Salaün, M. (2013) A new adaptive response surface method for reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 32, pp. 103-115, ISSN 0266-8920.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2012.10.001>
- Youn, B. D., Choi, K. K., Du, L. (2005). Adaptive probability analysis using an enhanced hybrid mean value method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29, pp. 134-148.
<https://doi.org/10.1007/s00158-004-0452-6>